

А. В. Алифанов, д-р техн. наук,
В. Н. Алехнович, ст. науч. сотрудник, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»;
Н. В. Бурносков, канд. техн. наук, БГТУ;
О. А. Толкачева, науч. сотрудник, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»

НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

The paper is devoted to hardening of wood-working tool by means of deposition of multilayer wear resistant coatings based on titanium nitrides and carbides and zirconium. The consideration is made of the problem of pre-cleaning and preparing of surfaces for deposition of hardening coatings. The data are given concerning effect of operating gas pressure on hardness of obtained coatings. The conducted mechanical adhesion and wear tests of coatings have confirmed their efficiency.

Введение. За рубежом широко применяются для ионно-плазменного упрочнения режущего инструмента покрытия на основе карбида, нитрида широкого ассортимента металлов IV–VI группы периодической системы элементов. Данные соединения обладают высокой энергией решетки ($6 \cdot 10^{-5}$ – $8 \cdot 10^{-5}$ Дж/моль), высокой прочностью и износостойкостью. Применение однослойных и многослойных покрытий на основе карбида, нитрида титана, циркония, гафния позволяет существенно повысить стойкость режущего инструмента. Использование широкого ассортимента материалов для упрочнения деревообрабатывающего инструмента, наносимого методом ионной технологии, позволяет получить наряду с высокой твердостью, также высокую жаростойкость и высокую химическую инертность материала инструмента.

1. Исследование процесса нанесения износостойких упрочняющих покрытий на основе нитрида, карбида титана на инструментальную сталь. При ионно-плазменном нанесении покрытий на рабочую поверхность деревообрабатывающего инструмента основными параметрами, влияющими на процесс, являются: ток дуги, температура подложки, давление технологического газа, потенциал подложки, время обработки. Изменение этих параметров изменяет условия конденсации плазменного потока, его характеристики и свойства полученных покрытий. Режим работы катода выбирается таким, чтобы обеспечить максимальную производительность процесса и качество покрытий. В результате исследований выбран ток дуги в пределах 70–100 А, который обеспечивает скорость напыления покрытий в пределах 0,2–0,3 мкм/мин при минимальной капельной фазе. При нанесении покрытий необходимо обеспечить их высокую адгезию к поверхности инструмента – подложке. Очень большую роль для процесса нанесения играет предварительная подготовка подложки, химическая и механическая очистка [1, 2]. После помещения инструмента в вакуумную камеру производится дальнейшая очистка поверхности при помощи ионной бомбардировки. Она обес-

печивает нагрев поверхности инструмента до температуры напыления, образование дефектов в поверхностном слое, нарушение кристаллического строения, изменение морфологии и состава, образование легированного подслоя, снижение шероховатости. Для технологического применения одним из главных факторов является тепловой эффект ионной бомбардировки, обусловленный тем, что только около 5% энергии бомбардирующих ионов затрачивается на распыление упрочняемой поверхности, а вся остальная часть идет на нагрев. Количество тепла, поступающее на упрочняемый инструмент за время t , можно выразить как

$$Q_u = ISUt, \quad (1)$$

где I – средняя плотность ионного тока на упрочняемой поверхности, А/см²; U – потенциал поверхности, В; S – площадь поверхности, см²; t – время обработки, мин.

Это тепло, если пренебречь потерями, полностью идет на нагрев инструмента до температуры T .

$$Q_u = c\rho V (T - T_0), \quad (2)$$

где c – теплоемкость материала детали; ρ – плотность; V – объем детали; T_0 – температура начала процесса; T – заданная температура.

Тогда минимальное время, которое необходимо для нагрева образца до заданной температуры, можно определить по формуле

$$t = \frac{c\rho V (T - T_0)}{ISU}, \text{ с.} \quad (3)$$

Для нашего образца $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м³; $S = 10^{-4}$ м²; время нагрева расчетное, при напряжении на подложке 700 В – 5 мин, при напряжении на подложке 1200 В – 2,5 мин. Это хорошо согласуется с экспериментом. Эксперимент показывает, что процесс нагрева приобретает квазистационарный характер через 10 мин после начала ионной бомбардировки. При выходе на стационар уравнение теплового баланса для инструмента составит

$$Q_u = Q_{\text{изл}} + Q_T, \quad (4)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – теплота, теряемая за счет излучения; Q_T – теплота, теряемая за счет теплопроводности.

При напылении в уравнение теплового баланса добавляются еще два члена: Q_k – теплота конденсации потока атомов, Q_p – энергия рекомбинации ионов с электронами.

Тогда для процесса напыления уравнение теплового баланса будет:

$$Q_{\text{и}} \pm Q_k + Q_p = Q_{\text{изл}} + Q_T, \quad (5)$$

т. к. теплота, теряемая излучением, при постоянной температуре среды постоянна, то влиять на температуру поверхности в процессе напыления при заданных параметрах процесса можно, изменяя количество теплоты, теряемое за счет теплопроводности. Если не учитывать нарушение теплового баланса при переходе от режима ионной очистки к режиму напыления, температура может опуститься ниже необходимой для процесса и тогда покрытие становится двухслойным, т. е. первый слой, нанесенный при температуре 400°C , плотный и гладкий, а второй рыхлый – с плохой адгезией. На основании вышеизложенного нами было выбрано такое термическое сопротивление для образца, чтобы при напряжении на поверхности 150 В температура не опускалась ниже 400°C , что обеспечивало получение плотных покрытий с хорошей адгезией.

Для исследования влияния давления рабочего газа на твердость покрытий были получены покрытия TiN и TiC при различных давлениях рабочих газов азота и ацетилена в диапазоне давлений $1,5 \cdot 10^{-2}$ – $6 \cdot 10^{-1}$ Па. Покрытия наносились на режущие пластинки из стали Р6М5 объемом $5 \cdot 10^{-7}$ м³ и имели площадь поверхности для напыления 10^{-4} м² (микротвердость пластинок 5 ГПа). В результате исследований установлено, что микротвердость образцов из стали Р6М5 с покрытием нитрида титана толщиной 2–6 мкм изменяется от 12 до 7 ГПа, уменьшаясь с ростом давления азота (рис. 1).

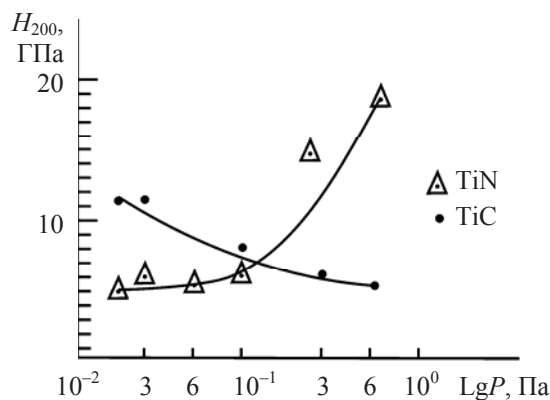


Рис. 1. Зависимость микротвердости системы подложка – покрытие от давления рабочего газа для однослойных покрытий на основе TiN и TiC

Следует отметить, что скорость нанесения покрытий уменьшается с ростом давления рабочего газа приблизительно в 1,8 раза, а также уменьшается количество капель в покрытии.

Микротвердость образцов из стали Р6М5 с покрытиями из карбида титана толщиной 2–6 мкм в диапазоне давлений ацетилена $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что микротвердость образцов изменяется от 6 ГПа до 16 ГПа при изменении давления ацетилена от $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па до $6 \cdot 10^{-1}$ Па и возрастает с ростом давления ацетилена.

Были проведены исследования внутренних напряжений в покрытиях. Для определения внутренних напряжений покрытий использовали пластинку из нержавеющей стали, закрепленную консольно, и по величине ее изгиба судили о внутренних напряжениях в покрытии. Установлено, что внутренние напряжения в покрытиях TiN и TiC – сжимающие. Следует отметить, что при нанесении TiN и TiC покрытия наносились двумя способами: с подслоем чистого титана толщиной ≈ 100 Нм и без подслоя. Установлено, что покрытия в диапазоне давлений рабочего газа от $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па до $6 \cdot 10^{-1}$ Па с подслоем Ti имеют меньшие внутренние напряжения, чем без подслоя, которые уменьшаются с ростом давления газа. Покрытия TiC без подслоя имеют меньшие внутренние напряжения, чем с подслоем и чем у покрытий TiN, т. е. покрытия TiN необходимо наносить на сталь с подслоем Ti, а покрытия TiC – без подслоя. Следует отметить, что сталь Р6М5 нельзя нагревать выше 500°C в связи с тем, что могут разупрочниться режущие кромки инструмента, в то время как сталь Р6М5К5 имеет теплостойкость до 600°C . Инструмент при ионной бомбардировке необходимо обрабатывать при циклическом режиме.

2. Исследование процесса нанесения многослойных упрочняющих покрытий на инструментальную сталь. Однослойные покрытия TiN и TiC широко используются в современном инструментальном производстве, однако их эффективность недостаточно высока [3–5]. Перспективным решением проблемы является нанесение многослойных покрытий. При нанесении многослойных покрытий адгезия определяется адгезией первого слоя, но нужно уделять внимание адгезии между слоями и свойствам переходных слоев. Следует отметить, что применение большого количества слоев не дает большого положительного эффекта т. к. известно, что оптимальная толщина покрытия 4–6 мкм [3], а при нанесении, например, десяти слоев толщина будет составлять 0,5 мкм, т. е. если наносить чередующиеся слои TiN и TiC, то получится результирующее покрытие из карбонитрида переменного состава. Для повышения эффективности покрытий

необходимо обеспечить их высокую износостойкость. Вследствие сложности условий износа нельзя сказать, что износ тем меньше, чем больше твердость покрытий. Одним из необходимых условий повышения износостойкости является высокая твердость, поскольку и абразивный, и адгезионный износы уменьшаются по мере увеличения твердости покрытий. Исходя из изложенного были получены двух- и трехслойные покрытия на основе TiN, и TiC по режимам, выбранным на основе исследований процесса. Была исследована микротвердость полученных покрытий и отдельных слоев. Следует отметить, что напыление производилось двумя способами. Первый способ – двух- и трехслойные покрытия наносились за один цикл. Второй способ – наносились сначала однослойные покрытия, затем измерялась их твердость и они помещались в камеру, нагревались ионной бомбардировкой и наносился второй слой, затем опять исследовалась их микротвердость, а потом наносился третий слой и исследовалась его твердость. Следует отметить, что при этом исследуется микротвердость композиция-подложка (сталь Р6М5). Истинную микротвердость покрытия можно определить по формуле. Результаты исследований микротвердости представлены на рис. 2 и 3.

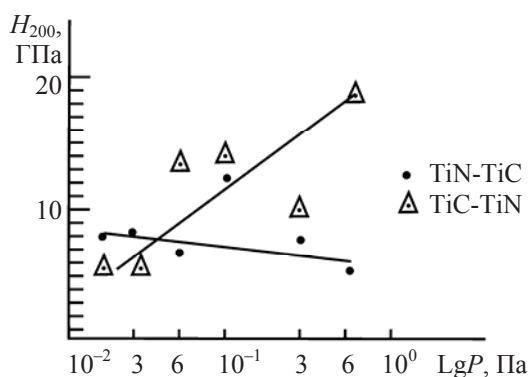


Рис. 2. Зависимость микротвердости системы подложка – покрытие от давления рабочего газа. Для двухслойных покрытий на основе TiN и TiC

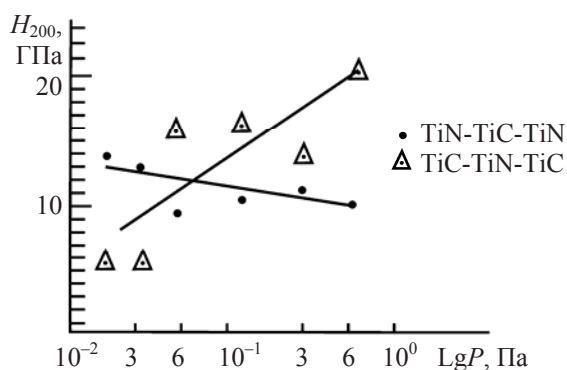


Рис. 3. Зависимость микротвердости системы подложка – покрытие от давления рабочего газа. Для трехслойных покрытий на основе TiN и TiC

Установлено, что микротвердость двух- и трехслойных покрытий, нанесенных первым и вторым способами, практически одинакова (в пределах точности измерений).

Толщина каждого слоя в покрытиях 2 мкм. Из рис. 2 и 3 видно, что микротвердость покрытий с внутренним слоем TiN и внешним слоем TiC возрастает с ростом давления рабочего газа до 18 Па. Для покрытий TiN-TiC-TiN микротвердость практически не меняется в диапазоне давлений рабочего газа, хотя имеет тенденцию к снижению с ростом давления газа. Микротвердость покрытий с внутренним слоем TiC, внешним TiN выше, чем у TiN и незначительно изменяется в диапазоне давлений, имея максимальное значение 12 ГПа при давлении 10⁻¹ Па. Трехслойное покрытие TiC-TiN-TiC имеет микротвердость в пределах 9–21 Па и возрастает с ростом давления рабочего газа. Внутреннее напряжение двух- и трехслойных покрытий значительно больше, чем однослойных.

Износостойкость покрытий на режущем инструменте определяется как твердостью самого покрытия, так и его адгезией к поверхности самого инструмента. Поэтому при определении новых износостойких материалов покрытий была поставлена задача – наряду с обеспечением высокой твердости поверхности установить режимы нанесения покрытий, обеспечить наличие промежуточных слоев, обеспечивающих адгезию самого покрытия. Сравнительные испытания покрытий на износ и адгезию проводились на машине трения СМЦ-2, на специальном стенде, смонтированном на базе токарно-винторезного станка 1А-616 и методом иглы (метод Вивера). Для моделирования процесса износа использовалась машина СМЦ-2 по схеме с открытым кинематическим контуром, когда образец с покрытием неподвижен (трение скольжения), а контртело вращается (линейная скорость образца 47,5/мин, нагрузка на образец 200–1000 Н). Испытания проводили до образования задиров. Сила прижима образца и коэффициент трения фиксировались динамометрами, отношение износа эталона (изменение массы) к износу испытуемого образца дает величину относительной износостойкости.

Для качественной оценки адгезии покрытия использован метод иглы, который заключается в нанесении на поверхность износостойкого покрытия иглой риски с возрастающей нагрузкой до тех пор, пока напыленный слой не отделится от подложки. В качестве иглы использовали твердосплавную, эльборовую пирамиду с углом заточки 120° и радиусом острия 0,05 мм.

В результате испытаний на износ режущих пластинок из стали Р6М5, упрочненных однослойными, двухслойными и трехслойными покрытиями из карбидов и нитридов титана,

наибольшую износостойкость показали покрытия TiC-TiN, нанесенные при давлении рабочего газа 10^{-1} Па, и покрытия TiC-TiN-TiC, нанесенные при давлении рабочего газа $6 \cdot 10^{-1}$ Па. На основании исследований процесса напыления был разработан техпроцесс для упрочнения режущего инструмента из стали Р6М5.

Ионная бомбардировка: давление в камере $1 \cdot 10^{-2}$ Па; ток дуги 70–80 А; напряжение подложки 1200 В; плотность ионного тока 5–7 мА/см². Время обработки от 2–10 мин. В зависимости от размеров детали вычисляется по приведенной формуле (3). Так как температура режущих кромок не должна превышать 500°C, ионная обработка проводится циклически, а общее время обработки представляет собой сумму рабочих циклов.

Напыление с ионной бомбардировкой: давление рабочего газа для покрытий TiC-TiN $(1-2) \cdot 10^{-1}$ Па; ток дуги 80–100 А; напряжение на подложке 100–200 В, температура подложки 400–450°C, время напыления каждого слоя 10 мин.

Для покрытий TiC-TiN-TiC давление рабочего газа $6 \cdot 10^{-1}$ Па; ток дуги 80–100 А; напряжение на подложке 150 В, температура подложки 400–450°C; время напыления каждого слоя 12 мин. Для дальнейшего повышения износостойкости инструмента с покрытиями были опробованы покрытия ZrN и TiN-ZrN. Установлено, что микротвердость покрытий ZrN возрастает с ростом давления азота и лежит в пределах 8–16 ГПа. Внутренние напряжения, наоборот, уменьшаются. То есть покрытия, полученные при давлении азота $6 \cdot 10^{-1}$ Па, имеют максимальную микротвердость и минимальные внутренние напряжения. Исследования показали, что капельная фаза в покрытиях на основе циркония значительно ниже, чем у покрытий на основе титана, а износостойкость покрытия из нитрида циркония в 1,5 раза выше, чем у покрытий из нитрида титана. Режим нанесения покрытий из нитрида циркония следующий: ионная бомбардировка: давление остаточных газов $3 \cdot 10^{-2}$ Па; ток дуги 110 А; напряжение на подложке 600 В; плотность ионного тока 7 мА/см²; время обработки 5–10 мин.

Напыление: давление азота $6 \cdot 10^{-1}$ Па; ток дуги 120 А; напряжение на подложке 110 В; температура подложки 400–450°C; время напыления 10 минут. Двухслойное покрытие TiN-ZrN, нанесенное при давлении рабочего газа $3 \cdot 10^{-1}$ Па для TiN и $6 \cdot 10^{-1}$ Па для ZrN по приведенной технологии показало повышенную микротвердость для двухслойных покрытий (19 ГПа), а при испытании на износостойкость показало наивысшую стойкость, что указывает на необходимость разработки многослойных покрытий на основе Ti и Zr.

Заключение. Использование многослойных покрытий на основе карбидов, нитридов тугоплавких металлов, а также использование барьерных промежуточных слоев позволяет решать задачу повышения стойкости и прочности режущего деревообрабатывающего инструмента в 1,5–4 раза.

Литература

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анцифоров [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 420 с.
2. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А. Н. Кострожицкий [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 250 с.
3. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
4. Прогрессивные методы изготовления металлорежущего инструмента / А. В. Белый [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ, 1989. – 48 с. – (Обзорная информация / БелНИИНТИ).
5. Перспективы применения металлорежущего инструмента с износостойкими покрытиями / Д. Н. Клауч [и др.] // Технология, организация производства и управления. – М.: ЦНИИТЭНтяжмаш, 1988. – Вып. 17. – 45 с.
6. Ионно-плазменная технология получения износостойких покрытий / В. П. Гольцев [и др.]. – Минск: БелНИИНТИ, 1987. – 44 с. – (Обзорная информация / БелНИИНТИ).